

## FLUX2D를 이용한 코깅토크의 해석



신중철  
재우전자(주) CAE팀장

고전압기기, 절연체, actuator, 선형 motor, 전자브레이크, 자기베어링, 각종sensor류등 전자기 현상을 이용한 모든 제품의 전자계 해석이 가능한 프로그램으로서 인버터등의 외부회로를 연결한 상태의 기기 해석도 가능하다. 회로1은 외부회로를 연결한 경우의 예제이다.

본 보고서는 외부 회로의 연결

에서 회전방향의 성분이다. 이렇게 함으로써 코깅토크는 진동, 소음, 그리고 영구자석기기의 출력에 맥동을 유발시키는 원인이 된다.

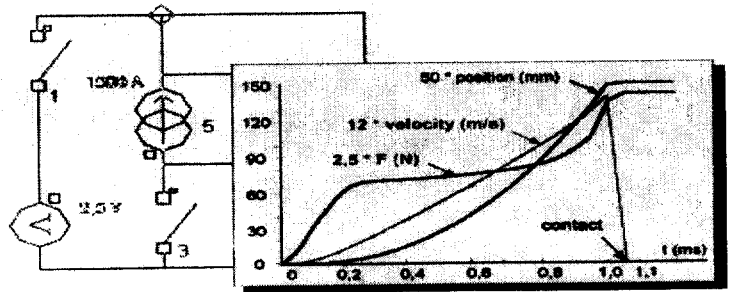
그림 1은 3개의 고정자 치와 관련된 영구자석의 2가지 위치 상태를 나타내고 있다. 영구 자석이 n극인 영구자석기기에서 하나의 극으로 보아도 된다는 점에 유의

### 1. 서 론

최근 들어 전자기장 현상을 수치해석 방법으로 해석하고 제품 설계에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 본 보고서는 수치해석 Package로 가장 폭 넓게 사용되고 있는 "FLUX2D"를 사용하여 코깅토크를 해석한 것을 내용으로 하고 있다.

"FLUX2D"는 2차원적인 전자기장현상을 유한요소법을 사용하여 평면과 축대칭면에서 정전계, 정자계, 전자계에서의 동특성, 과도현상, 온도의 정상 및 과도현상, 전기열, 자기열등을 해석하는 프로그램으로서 "FLUX3D"가 3차원적인 전자기장 현상을 유한요소법으로 해석하는데 비하여 2차원으로 용이하게 사용할 수 있다.

"FLUX2D"는 DC motor, 동기기, 유도기, Stepping motor, B/L DC motor, PM motor, 발전기 등을 비롯한 각종회전기류, 각종 변압기, 에너지 변환기, 전력케이블,



circuit 1. Transient analysis of the electro-mechanical behavior of an electrovalve. An external circuit was used to describe the current limiter.

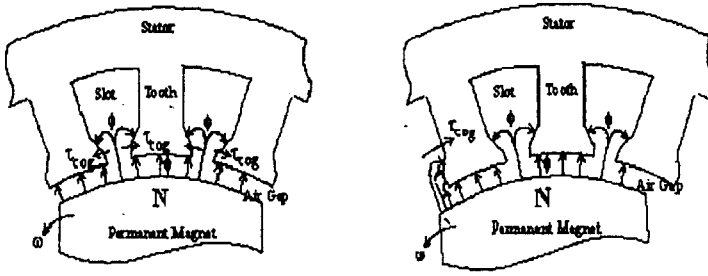
이 필요 없는 코깅토크의 해석을 대상으로 하였다.

### 2. 해석 사례

코깅토크는 브러시가 없는 영구자석기기에서 회전자에 장착된 영구자석과 고정자 사이에 작용되고 있는 자기적인 인력에 의하여 발생된다. 공극의 자기저항을 최소로 하기 위한 이 작용은 인력 중

하기 바랍니다.

그림1a에서 영구자석은 고정자의 치의 수를 가장 많이 갖는 위치에 있다. 이 지점에서는 고정자 치로 유입되는 자속에 의한 자력의 회전방향 성분은 서로 상쇄된다. 그래서 결국 코깅토크의 합은 0이된다. 그림1b에서는 회전자가 반시계방향으로 약간 회전되어있다.



a. Net cogging torque equal to zero

b. Net cogging torque magnitude greater than zero

where:  $\theta$  is the magnetic flux (Wb)  
 $\tau_{cog}$  is the cogging torque (N-m)  
 $\omega$  is the angular velocity of the rotor (rad/sec)

Figure 1. Cogging torque production

이 지점에서는 회전방향 성분의 자력이 완벽히 서로 상쇄되지 않는다. 따라서 코깅토크는 발생되게 되고 이 힘은 영구자석을 그림 1a에 표시된 지점으로 다시 복원시키려고 한다.

코깅토크의 최소화 기법을 6극, 18슬롯, 영구자석을 표면에 부착한 기기에 적용하였다. 그림2에 나타난 기기의 단면을 표현하기 위해 각 점들을 파라메타로 취급하였다. 이렇게 하면 여러 가지의 코깅토크의 최소화 기법을 적용하여 분석하려고 할 때 그 적용이 용이하게 된다.

이렇게 단면도가 Flux2D에 입력되었다. 또한 이것은 모델의 대칭성이 있을 때의 적용도 가능하게 해준다.

모터의 회전은 Flux2D의 이동공극(moving air gap)기법에 의해 수행되었고, 두 개의 동심원이 이동공극의 영역이 된다. 공극이 회전자와 고정자 사이에 있도록 두 동심원의 반지름도 파라메타로 취급하였다.

모델로 잡은 모터의 단면전부를 요소분할을 함으로써 그 요소수가 엄청나게 많아진다. 원의 반경을

파라메타화하여 회전자 반경의 반이 되도록하고, 이 원의 내부에 있는 요소 수를 적게 취한다. 이렇게 회전자 안쪽 내부의 요소 수를 줄여도 코깅토크의 해석 결과에는 아무런 악 영향을 끼치지 않는다.

우선, 회전자 반경의 반이 되는 원, 이동공극의 경계, 고정자의 외부 표면의 원을 각각 27, 300, 55개의 선분으로 분할한다. 요소 분할이 끝난 뒤부터 0.5초의 시간 간격으로 코깅토크의 한 주기(20도)를 해석한다.

코깅토크 계산의 초기 요소 분할을 위해 회전자 반경의 반이 되는 원, 이동공극의 경계, 고정자의 외부 원이 각각 9, 100, 50개의 선분으로 나누어졌고, 이 때의 요소 수는 4134이고 절수는 8319이다. 이 요소 망으로는 0.5초의 시간 간격으로 코깅토크의 한 주기를 계산하는데 대략 1시간 정도 소요되며, 두 경우 모두 이동공극 경계 상에 절점이 추가되지 못하도록 고정시켰다.

영구자석은 희토류 자석이며, 회전자와 고정자의 철심은 모두 비선형 등방성의 철심이 사용되었다. 자기 재료의 특성치는 Flux2D

의 데이터뱅크를 사용하고, 여기서 잔류자장과 비투자율이 활용되었다. 비선형고리를 위해 스칼라 스프라인을 이용하였으며 이 때에는 자속밀도, 자장의 세기는 물론 포화자속 밀도를 알아야 한다.

Flux2D의 실제 계산에서 그림2와 같은 평면도면을 이용하고, 축방향의 길이를 활용하게 된다. 시간 영역계산을 수행하며, 영구자석은 그림2와 같이 번호를 주어 극의 이루게 한다. 그림 2의 영구자석의 쌍 1, 2, 3에 대한 자화 방향을 각각,  $60^\circ$   $-60^\circ$   $180^\circ$  를 주었다.

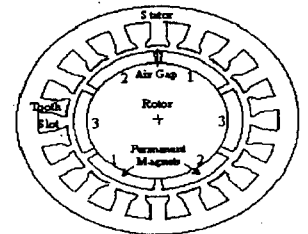


Figure 2. Cross Section of a Six Pole, Eighteen Slot, Surface Mounted PM Machine

고정자의 외부는 자위가 0인 Dirichlet 경계조건을 부여하였다. 이동공극의 속도는 0.16667rpm(1/6)를 주었으며 이렇게 함으로써, 매 시간 스텝에서 회전자의 위치를 Flux2D의 REGGEN에서 잘 맞출 수 있게 된다.

Newton-Raphson법을 이용하였으며, 초기의 회전자 위치는 그림 2와 같다. 이미 언급한 바와 같은 두 개의 메쉬 모양에 대해 공히 0.5초 시간 간격과 Newton-Raphson법에서의 반복회수 및 허용오차를 각각 20번 및 0.001로 주었다. 각 경우 모두 먼저 허용오차에 의해 다음 단계로 천이 하였다.

그림3은 그림2에 보여준 기초 모델을 해석한 코깅토크의 한 주기를 회전자 위치에 따라 나타낸 것이다. 그림3에서 보듯이 코깅토크의 크기는 두 메쉬 모양에 따라 약간 달리하는 것을 알 수 있으며 처음 메쉬(더 많은 요소와 절점을 가진 것)에서는  $0.64N \cdot m_{pp}$  나중의 것은  $0.65N \cdot m_{pp}$ 의 코깅토크 폭을 가지고 있다.

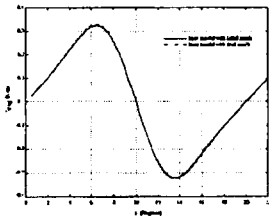


Figure 3. Cogging Torque Versus Rotor Position(for Base Models)

코깅토크 최소화기법 중의 하나는 자석의 호의 길이를 변화하며 해석해 나가는 것이다. 그림1을 참고로 하면, 영구자석이 고정자의 슬롯으로 들어가면서부터 자석의 앞부분과 뒷부분에서 각각 회전방향의 코깅토크를 발생함을 알 수 있다. 자석 호의 길이를 변화시킨다는 것은 직접 영구자석의 피치와 표면적을 바꾸는 것이다. 이 양자는 모두 기기의 토크에 영향을 미치는 중요한 파라미터인 것이다.

자석의 피치는 영구자석의 앞부분과 뒷부분의 길이를 각도로 표현한 것이다. 호의 길이를 줄여서 자극의 피치를 작게 하면 당연히 자석의 앞뒤부분이 가까워지는 것이다. 이것은 자석의 양끝 부분에서 발생하는 회전방향의 자력을 달리하는 원인이 되며, 자석의 피치와 슬롯의 피치의 관계에 따라 코깅토크의 증감을 가져오게

된다.

자석의 호의 길이를 줄이게 되면 영구자석의 표면적이 줄게 되고, 따라서 자력선의 감소와 기기의 코깅토크가 줄게 된다.

모델에 나타난 점들은 극좌표( $r, \theta$ )로 나타내었으며, 회전자의 반경과 각도의 관계는 다음과 같다.

$$r = \left\{ \begin{array}{l} r_{bi} \\ r_{bi} + 1p_m \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\theta = k \frac{360}{P} \pm \frac{1}{2} \theta_{pm},$$

$$\text{for } k=0 \text{ to } P-1 \quad (2)$$

여기서  $r_{bi}$ 는 회전자 철심의 외경,  $1p_m$ 는 영구자석의 축방향의 길이,  $p$ 는 극수,  $\theta_{pm}$ 는 영구자석의 호의 길이로서 55도에서 60도까지 1도씩 변화한다.

표1은 자석 호의 길이 변화와 관련된 메쉬정보를 나타내고 있다. 55도, 56도, 57도 그리고 58도의 자석의 호 길이에 대해서도 똑 같으니 초기 절점 수를 적용하였다. 그러나 호의 길이가 증가함에 따라서 초기 절점 수에서 요소 수와 절점수가 줄어들었고 각 경우에 있어서 잘못된 요소는 없었다. 59도의 자석 호 길이에 대하여는 4174개의 요소 수와 8399개의 절점수로 형성되었다. 이 경우에는 회전자와 영구자석 사이 부근에서 18개의 좋지 않은 요소가 발생되었다. 영구자석 쪽에서는 기하학적으로, 회전자 철심부에서는 대수적으로 분할하여 질이 좋지 않은 요소 수를 줄일 수 있었다. 60도의 경우는 55도에서 58도의 경우와 유사하였다.

시간간격을 0.5초에서 0.3초로 변경하여 보았다. 0.3초 간격의 시간으로 계산한 경우는 구간 연속이 아니라 거의 연속적인 변화

를 보이는 코깅토크가 그려졌다. 그림4는 자석호의 길이가 55도에서 60도까지의 토크를 회전자 위치에 따라 한 주기를 보여주고 있다. 그림4로부터 자석호의 길이가 55도에서 60도까지 증가하면서 코깅토크의 크기도 증가함을 알 수 있다. 코깅토크의 최대 폭은 55도인 경우는  $0.52N \cdot m_{pp}$ 이나, 50도인 경우는 대략  $0.69N \cdot m_{pp}$ 이다.

코깅토크의 그림 모양도 자석호의 길이에 따라 변한다. 그림4에서, 호의 길이가 55도인 경우에 코깅토크가 양으로 되는 것은 그림2에 나타난 정상 위치에서 5도 정도 움직였을 때부터이나 60도의 경우는 7도정도의 이동이 있을 후 부터이다.

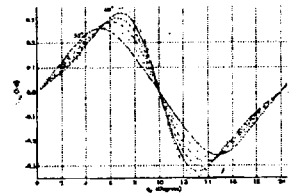


Figure 4. Cogging Torque Versus Rotor Position with Varying Magnet Arc Length

자석호의 길이를 변화시키는 것은 영구자석기기의 코깅토크를 줄이는 하나의 방법이나, 모든 점들을 파라미터화함으로써 Flux2D를 사용하여 다른 방법의 기법도 적용하여 분석할 수 있다.

### 3. 결 론

상기의 사례와 같이 FLUX2D를 이용하여 모터의 코깅토크를 용이하게 해석할 수 있다. 같은 방법으로 자석호의 길이만이 아니라 코아형상을 변경하면서도 코깅토크 해석이 가능하다.

상기의 해석결과를 발전시키면 motor의 출력 토크는 크게 발생하면서도 코깅토크는 작게 발생되는 영구자석 및 코아형상을 얻을 수 있게된다.

2차원 평면상의 해석 문제는 이와 같이 FLUX2D를 이용해서 대부분 해석할 수 있으나 코아의 적층높이와 영구자석의 높이가 현저히 달라 overhang 효과가 크게 작용하는 경우는 FLUX3D를 이용해서 해석해야 된다.

Table 1. Mesh Information Relating to Variations in the Magnet Arc Length.

$q_m$ (degrees)	Number of elements	Number of nodes	Number of faulty mesh elements	General location of faulty elements
55	4236	8523	0	-
56	4230	8511	0	-
57	4202	8455	0	-
58	4134	8319	0	-
59	4440	8931	3	In rotor back iron by PM fillers
60	4104	8259	0	-

< 이상돈 위원 >